ПЛАЗМЕННЫЙ МАЗЕР В ИОНОСФЕРЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD189733b

Зайцев В.В., Шапошников В.Е.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

PLASMA MASER IN THE IONOSPHERE OF EXOPLANET HD189733b

Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E.

Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia

Using the example of hot Jupiter HD 189733b, the plasma mechanism of radio emission generation from exoplanets with a weak magnetic field is analyzed in order to clarify the conditions under which the maser effect for this mechanism can be realized. The plasma parameters, the required concentration of nonequilibrium electrons, as well as the energy density of plasma waves are determined, at which the plasma mechanism is sufficiently effective so that the resulting electromagnetic radiation can be detected on Earth by existing radio telescopes.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-131-134

1. Введение

Поиски радиоизлучения планет, находящихся за пределами Солнечной системы, проводились еще до их экспериментального обнаружения и интенсивно продолжают до настоящего времени. Цель этих поисков – во-первых, расширить возможные методы обнаружения экзопланет и, во-вторых, получить оценки значений магнитных полей на экзопланетах. При анализе радиоизлучения экзопланет обычно предполагается, что механизмом радиоизлучения является электронный циклотронный мазер, который сразу дает информацию о величине магнитного поля. Вместе с тем, до настоящего времени многочисленные попытки обнаружить радиоизлучение экзопланет не дали убедительных результатов. Причина этой неудачи может оказаться в том, что ионосферы экзопланет могут быть наполнены достаточно плотной плазмой, так что не выполняется необходимое условие реализации электронно циклотронного мазера, когда электронная гирочастота f_c должна, как минимум, в три раза превышать плазменную частоту f_p . Действительно, для двух хорошо изученных горячих Юпитеров HD209458b и HD189733b были получены распределения магнитного поля и концентрации плазмы в их магнитосферах, [1–3], и оказалось, что большие плотности ионосферной плазмы сохраняются вплоть до границ магнитосфер, так что электронная гирочастота оказывается меньше плазменной, и генерация радиоизлучения за счет реализации механизма электронного циклотронного мазера невозможна. В связи с этим на примере экзопланеты HD189733b мы исследуем возможность реализации мазер-эффекта в рамках плазменного механизма радиоизлучения. Этот механизм представляет

собой двухступенчатый процесс: вначале возбуждаются плазменные волны, а наблюдаемое электромагнитное излучение возникает на следующем этапе благодаря рассеянию плазменных волн на частицах плазмы или нелинейному слиянию двух плазменных волн друг с другом. Плазменный механизм генерации эффективен в условиях плотной плазмы, когда плазменная частота превышает электронную гирочастоту, поэтому он может проявляться на более высоких частотах по сравнению с частотами, на которых реализуется механизм электронного циклотронного мазера. Это обстоятельство может сместить поиски радиоизлучения экзопланет в сторону более высоких частот.

2. Генерация плазменных волн в слабозамагниченной ионосфере

Рассмотрим возможность реализации плазменного механизма генерации радиоизлучения в ионосфере горячего Юпитера HD 189733b. Указанная экзопланета имеет массу $M_p \approx 1,14M_J$, радиус $R_p \approx 1,14R_J$, магнитный момент $0,3 \mu_J$ и орбитальное расстояние $\approx 0,031 AU$. Индекс j здесь относится к соответствующим параметрам Юпитера. Максимальная концентрация плазмы в магнитосфере составляет $n_{max} \approx (3 - 5)10^9 \text{ см}^{-3}$ ($f_p \approx 560 \text{ MHz}$), а среднее магнитное поле $\approx 0,3 - 1,5 G$ ($f_c \approx 0,9 - 4,5 \text{ MHz}$). Планета удалена от Земли на расстояние 19,3 pc. В данном случае большая плотность ионосферной плазмы сохраняется до границы магнитосферы $(2,2 - 3,2)R_p$, так что выполняется условие $f_c \ll f_p$, которое делает невозможной генерацию радиоизлучения за счет реализации механизма электронного циклотронного мазера [4] и позволяет исследовать генерацию плазменных волн в изотропной плазме на частотах $\omega_p^2 = \omega_L^2 + 3k_p^2 v_T^2$, где $\omega_L^2 = 4\pi e^2 n / m_e$, n – концентрация плазмы, k_p – волновой число плазменных волн, $v_T = \sqrt{k_B T / m_e}$ и T – тепловая скорость электронов и температура плазмы, k_B – постоянная Больцмана. Если в ионосфере экзопланеты кроме основной плазмы имеется компонента энергичных электронов с температурой $T_s \gg T$, концентрацией $n_1 \ll n$ и неравновесной функцией распределения, возникает возможность возбуждения плазменных волн. Если неравновесность обусловлена наличием «конуса потерь», что весьма вероятно для ионосферы при наличии даже достаточно слабого магнитного поля, возникает генерация плазменных волн с инкрементом [5] $\gamma \approx 3 \times 10^{-2} n_1 n^{-1} \omega_L$. Необходимым условием неустойчивости является превышение инкремента над эффективной частотой столкновений электронов с ионами, $\gamma > \nu_{ei} \approx 50n / T^{3/2}$, что зависит от распределения концентрации и температуры в ионосфере планеты.

На рис. 1 показано изменение концентрации и температуры с расстоянием от центра планеты (рисунок адаптирован из данных работы [4]). На рис. 2 приведены пороговые значения концентрации быстрых частиц, вы-

ше которых инкремент неустойчивости плазменных волн превышает эффективную частоту электрон-ионных столкновений.

Рис. 1.

Рис. 2.

3. Мазер-эффект при рэлеевском рассеянии плазменных волн в электромагнитные

Рэлеевское рассеяние возбуждаемых плазменных на ионах основной плазмы приводит к радиоизлучению на частоте, близкой к частоте ленгмюровской волны. В уравнении для яркостной температуры радиоизлучения

$$\frac{dT_B}{dl} = a_{sc} - (\mu_{sc} + \mu_c)T_B. \quad (1)$$

В уравнении (1) член a_{sc} описывает спонтанное рассеяние плазменных волн в электромагнитные волны, μ_{sc} – коэффициент индуцированного рассеяния плазменных волн в электромагнитные, μ_c – коэффициент поглощения электромагнитных волн, обусловленный кулоновскими столкновениями электронов:

$$a_{sc} = \frac{\pi}{36} \frac{\omega_L^3 W_k}{v_g n v_T^2 k_p}, \quad \mu_{sc} = -\frac{\pi}{108} \frac{m_e \omega_L^3}{m_i v_g n T v_T^2 k_p} \frac{\partial}{\partial k_p} (k_p W_k), \quad \mu_c = \frac{\omega_L^2 v_{ei}}{\omega_t^2 v_g}. \quad (2)$$

В (2) $v_g = c(1 - \omega_L^2/\omega_t^2)^{1/2} = \sqrt{3}ck_p v_T/\omega_p$ – групповая скорость электромагнитных волн с частотой $\omega_t^2 \approx \omega_p^2 = \omega_L^2 + 3k_p^2 v_T^2$ в области генерации плазменных волн, ω_t – частота электромагнитной волны, m_i – масса иона. Когда отрицательный коэффициент индуцированного рассеяния достаточно велик по модулю, тогда результирующий множитель в правой части уравнения переноса становится отрицательным, и индуцированный эффект при рэлеевском рассеянии становится преобладающим над столкновительным поглощением. В результате возникает экспоненциальная зависимость яркостной температуры и интенсивности электромагнитного излучения от плотности энергии плазменных волн, т.е. реализуется мазер-эффект при рэлеевском рассеянии плазменных волн в электромагнитные [6]

$$T_B = 3 \frac{m_i}{m_e} T \left\{ \exp \left[\frac{\pi}{18\sqrt{3}} \frac{m_e}{m_i} \frac{\omega_p}{c} \frac{\langle v_{ph} \rangle}{v_T} L_n w \right] - 1 \right\} \exp(-\tau_c^{ext}), \quad (3)$$

где τ_c^{ext} – оптическая толщина столкновительного поглощения на пути от аионосферы экзопланеты вне области генерации плазменных волн и поглощение в плазме звездного ветра. Заметим, что при генерации излучения на второй гармонике плазменной частоты мазер-эффект не реализуется вследствие возникновения распада электромагнитной волны на две плазменные при больших интенсивностях. На рис. 3 приведены минимальные значения относительной плотности энергии плазменных волн W_p , необходимые для реализации на уровне Земли потока радиоизлучения в один Янский (сплошные линии), и частота генерируемого радиоизлучения (пунктирная линия) в зависимости от линейного размера источника в ионосфере экзопланеты.

Рис. 3.

При этом соответствующие значения яркостной температуры в источнике радиоизлучения составляют $T_b \approx (10^{18} \div 5 \times 10^{16})$ K в диапазоне частот (50 ÷ 350) MHz. Актуальной остается проблема ускорения частиц в магнитосферах экзопланет, которая не рассматривалась в данной работе.

Работа поддержана грантом РНФ № 20-12-00268 (раздел 3), грантами РФФИ №№ 20-02-00108 (разделы 1,3), 19-02-00704 (разделы 1, 2), Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2020-780), а также Госзаданием (тема 0035-2019-0002)

Литература

1. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Sasunov Y.L., et al. // *Astrophys. J.*, 2014, V. 795, Issue 2, id. 132, 15 pp. DOI: 10.1088/0004-637X/795/2/132
2. Kislyakova K.G., Holmstrom M., Lammer H., et al. // *Science*, 2014, V. 346, Issue 6212, pp. 981-984. DOI: 10.1126/science.1257829
3. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Prokopov P.A. // *Astrophys. J.*, 2015, V. 813, Issue 1, article id. 50, 18 pp. DOI: 10.1088/0004-637X/813/1/50
4. Weber C., Lammer H., Shaikhislamov I.F., et al. // *MNRAS*, 2017, 469, 3505–3517. DOI: 10.1093/mnras/stx1099
5. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. // *Astron. Astrophys.*, 1975, V. 45, No. 1, pp. 135-140.
6. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. // *Solar Physics*, 1983, V. 88, Issue 1-2, pp. 297-313. DOI 10.1007/BF00196194